

## 两种NiAl基合金在酸腐蚀工况下的磨损特性\*

王振生<sup>1,2</sup> 杨双双<sup>1</sup> 彭真<sup>1</sup> 谭清奇<sup>1</sup> 郭建亭<sup>3</sup> 周兰章<sup>3</sup>

1. 湖南科技大学先进矿山装备教育部工程研究中心 湘潭 411201

2. 湖南科技大学高温耐磨材料及制备技术湖南省国防科技重点实验室 湘潭 411201

3. 中国科学院金属研究所 沈阳 110016

**摘要** 研究了NiAl-2.5Ta-7.5Cr-x(0, 1)B合金在5% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>溶液中的腐蚀磨损特性, 结果表明: 在酸腐蚀工况下NiAl-2.5Ta-7.5Cr-1B合金的耐蚀性能优于NiAl-2.5Ta-7.5Cr合金, 易钝化成膜, 静置腐蚀速率为0.007 mg/(cm<sup>2</sup>·h), 钝化电流密度为0.299(μA·cm<sup>-2</sup>), 自然腐蚀电位为-0.213 V, 表现出良好的耐酸腐蚀性能及稳定性。物质膜完整地覆盖在NiAl-2.5Ta-7.5Cr-1B合金的磨损表面, 抑制了腐蚀对磨损的加速作用, NiAl-2.5Ta-7.5Cr-1B合金比NiAl-2.5Ta-7.5Cr合金的腐蚀磨损率减小了2-8倍。NiAl-7.5Cr-2.5Ta-1B合金的磨蚀, 受控于腐蚀磨损和完整的物质膜的保护作用。NiAl-2.5Ta-7.5Cr合金的磨损机制, 受控于腐蚀磨损和磨粒磨损。

**关键词** 金属材料, NiAl-2.5Ta-7.5Cr合金, NiAl-2.5Ta-7.5Cr-1B合金, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 腐蚀磨损, 磨损机制

**分类号** TH117, TG172

**文章编号** 1005-3093(2015)08-0595-07

## Corrosive-Wear Properties of Two NiAl Alloys in Sulfuric Acid Solution

WANG Zhensheng<sup>1,2\*\*</sup> YANG Shuangshuang<sup>1</sup> PENG Zhen<sup>1</sup> TAN Qingqi<sup>1</sup>  
GUO Jianting<sup>3</sup> ZHOU Lanzhang<sup>3</sup>

1. Engineering Research Center of Advanced Mining Equipment, Ministry of Education, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China

2. Hunan Provincial Key Laboratory of National Defense Science and Technology for High Temperature Wear Resistance Materials and Preparation Technology, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China

3. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

\*Supported by Natural Science Foundation of Hunan Province No.13JJ8015, National Natural Science Foundation of China No. 51101055.

Manuscript received November 10, 2014; in revised form February 1, 2015.

\*\*To whom correspondence should be addressed, Tel: 13298528387, E-mail: zswang@imr.ac.cn

**ABSTRACT** The corrosion wear properties of NiAl-2.5Ta-7.5Cr-x(0, 1)B alloys in 5% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution have been investigated at room temperature. The results show that in comparison with NiAl-2.5Ta-7.5Cr alloy, NiAl-2.5Ta-7.5Cr-1B alloy exhibited better corrosion resistance to 5% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution with passive current density 0.299(μA·cm<sup>-2</sup>) and free corrosion potential -0.213 V. For which the key factor is that a passive film could form on the surface of NiAl-2.5Ta-7.5Cr-1B alloy. The corrosion wear rate of NiAl-2.5Ta-7.5Cr-1B alloy decreased 2-8 times compared with NiAl-2.5Ta-7.5Cr alloy. The abrasion erosion mechanism for NiAl-7.5Cr-2.5Ta-1B alloy was dominated by the synergistic effect of corrosion wear and protectiveness of passive film. While that for NiAl-7.5Cr-2.5Ta alloy was mainly corrosion wear and abrasive wear.

**KEY WORDS** metallic materials, NiAl-2.5Ta-7.5Cr alloy, NiAl-2.5Ta-7.5Cr-1B alloy, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, corrosive wear, abrasion mechanism

\* 湖南省自然科学基金13JJ8015和国家自然科学基金51101055资助项目。

2014年11月10日收到初稿; 2015年2月1日收到修改稿。

本文联系人: 王振生

长程有序金属间化合物NiAl具有高熔点(1640℃)、高导热率(70~80 W/m·K)、低密度(5.86 g/cm<sup>3</sup>)以及优异的抗腐蚀性能<sup>[1-3]</sup>。多年来, 人们从合金化、制备内生和外生复合材料的角度出发, 采用固

溶强化、第二相强化、氧化物弥散强化(ODS)等方法提高了NiAl合金的抗高温蠕变性能和室温断裂韧性。

NiAl基合金虽然较难达到2%的室温拉伸塑性,但是具有良好的压缩强度和压缩塑性。考虑到磨损工况下自然的压应力状态,国内外学者研究了多种NiAl材料的磨损性能。结果表明,在室温磨损工况下合金的拉伸塑性与硬度、强度、压缩塑性和加工硬化能力相比成为次要的性能指标,其干摩擦磨损受控于塑性变形<sup>[4-5]</sup>,具有较好的耐磨损性能;在大气和干摩擦的条件下合金在700℃-900℃的高温磨损中有良好的自润滑和耐磨损特性,摩擦系数和磨损率比Ni基自润滑合金(合金含有W、Mo、Co)的低,自润滑特性具有持久性<sup>[6-7]</sup>。另外,通过添加合金元素NiAl基合金在常温-900℃均可产生自润滑特性<sup>[8-9]</sup>。这为NiAl基合金的实际应用提供了研究思路。考虑到NiAl具有高稳定性的长程有序晶体结构,其表面可稳定在原子尺度水平,可用作催化研究的基片材料<sup>[10]</sup>,包括S、CO、O和Xe的吸附研究<sup>[1]</sup>。因此,结合NiAl基合金良好的摩擦磨损特性探索NiAl基合金在腐蚀工况下的摩擦磨损特性,对拓宽NiAl基合金的实际应用范围有重要的意义。

## 1 实验方法

### 1.1 样品的制备

以高纯Ni、Al、Ta、Cr、Ni-B (>99.9%, 质量分数)为原料,使用VAM-I型高真空电弧炉熔炼名义成分NiAl-2.5Ta-7.5Cr和NiAl-2.5Ta-7.5Cr-1B(%, 原子分数)的合金。用线切割切取厚度为4 mm的磨损试样、尺寸为4 mm×10 mm×10 mm的静态腐蚀试样以及侧面四周切取凹槽的尺寸为4 mm×10 mm×10 mm的电化学极化曲线试样。将试样表面磨至1200号砂纸,经丙酮+酒精超声波清洗,烘干。使用分析纯级H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>和蒸馏水,按质量分数配成浓度为5%的H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>溶液。

### 1.2 静态浸泡腐蚀实验

根据ASTM31-72标准,将尺寸为4 mm×10 mm×10 mm的静态腐蚀试样经无水乙醇+丙酮超声波清洗、烘干、称重,然后置入H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>溶液中静置72 h。腐蚀试验结束后,将试样清洗、烘干后称重,两次质量的差值为腐蚀产生的质量损失。静态腐蚀率为 $V = (W_{\text{before}} - W_{\text{after}}) / St$ 计算,式中 $W_{\text{before}}$ 为试验前试样的质量(mg); $W_{\text{after}}$ 为试验后试样的质量(mg); $S$ 为试样的面积(cm<sup>2</sup>); $t$ 为试验时间(h)。

### 1.3 电化学腐蚀实验

采用CHI760E型电化学工作站测试动电位极

化曲线,选取三电极体系,试样为工作电极,大面积Pt片为辅助电极,饱和甘汞电极为参比。电化学试样用环氧胶密封,一端引出导线,露出1 cm<sup>2</sup>作为工作面,测试前用无水乙醇+丙酮经超声波清洗、干燥后放入腐蚀介质中浸泡10 min,待开路电位稳定后测量电化学极化曲线,扫描速度5 mV/s,极化范围相对开路电位正负0.3 V。利用CH660E自带软件求得自腐蚀电流密度。

### 1.4 腐蚀磨损试验

使用HRS-2M高速往复摩擦磨损试验机测试两种材料的摩擦磨损性能。配副试样是直径为4 mm的Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>陶瓷球。将载荷施加于球则试样在夹具带动下往复运动,形成球与试样接触表面的滑动磨损。实验在室温、H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>溶液中进行,载荷为10 N和45 N,滑动速度为0.05 m/s和0.1 m/s,单次往复滑动距离为10 mm,磨损时间为60 min。摩擦因数由设备监控记录。用NanoMap-500LS三维接触式表面轮廓仪测得磨损体积量。磨损率为 $W = V / (F \cdot L)$ ( $W$ 为磨损率,其中 $V$ 为磨损体积损失, $F$ 为载荷, $L$ 为滑行距离)。取三次磨损试验的平均值。

使用配置了能谱仪(EDS)的S-3400N型扫描电镜(SEM)观察合金组织形貌和摩擦表面形貌。用HV-50维氏硬度计测试合金的维氏硬度,载荷500 g,加载时间15 s。用万能力学试验机测试合金室温压缩强度,压缩应变速率为 $2.78 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。用D/Max-2550 PC X射线衍射仪分析合金静态腐蚀试样的相组成。

## 2 实验结果和讨论

### 2.1 合金的静置腐蚀

NiAl-2.5Ta-7.5Cr合金和NiAl-2.5Ta-7.5Cr-1B合金静置腐蚀72 h后,H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>溶液均无变色无沉淀,试样表面均呈灰黑色。NiAl-2.5Ta-7.5Cr合金的静态腐蚀率为0.009 mg/(cm<sup>2</sup>·h),NiAl-2.5Ta-7.5Cr-1B合金的静态腐蚀率为0.007 mg/(cm<sup>2</sup>·h)。根据中国耐蚀性四级标准<sup>[11]</sup>,这两种合金在5% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>溶液中的腐蚀率均为第二级,即具有良好的耐腐蚀性能。

图1给出了腐蚀前后两种合金的SEM图片。结合EDS并对比图1a、b可见,在NiAl-2.5Ta-7.5Cr合金表面生成了生成了一层反应物,在合金相界处呈现显著的点状腐蚀凹坑以及少量裂纹特征。对比图1c、d可见,NiAl-2.5Ta-7.5Cr-1B合金表面也生成了一层反应物,合金相界处呈现剥落腐蚀以及大量裂纹特征。在相界处产生的不溶性腐蚀产物体积大于

消耗的基体金属体积, 对周围晶粒产生了楔形拉力。同时, 使相界受到张应力作用, 加速了裂纹的萌生与扩展; 当腐蚀发展到一定程度时裂纹扩展引起分层剥落, 即发生剥落腐蚀。图2给出了两种合金腐蚀前后的XRD图谱。从图2可见, 在NiAl-2.5Ta-7.5Cr合金表面生成了一层由NiCrO<sub>3</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、AlH(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>等组成的反应物膜, 在NiAl-2.5Ta-7.5Cr-1B合金表面生成了一层由NiCrO<sub>3</sub>、B<sub>2</sub>O以及TaO构成的反应物膜。

2.2 合金的电化学腐蚀

两种合金的极化曲线测试结果, 如图3所示。

可以看出, 两种合金的极化曲线具有相同的形状。当极化电压达到合金的自腐蚀电位-0.20 V左右时合金先进入活性溶解区; 当极化电压继续增加到合金的致钝电位-0.15 V左右而极化电流密度达到致钝电流密度后, 随着极化电压的增加极化电流密度稍减小。这说明, 在H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>溶液中这两种合金均发生了钝化。表2给出了两种合金在H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>溶液中的电化学测试参数。NiAl-2.5Ta-7.5Cr合金的自然腐蚀电位为-0.236 V, 钝化电流密度3.524 μA·cm<sup>-2</sup>; NiAl-2.5Ta-7.5Cr-1B合金的自然腐蚀电位为-0.213 V, 钝化电流密度0.299 μA·cm<sup>-2</sup>。这表明, 相比NiAl-

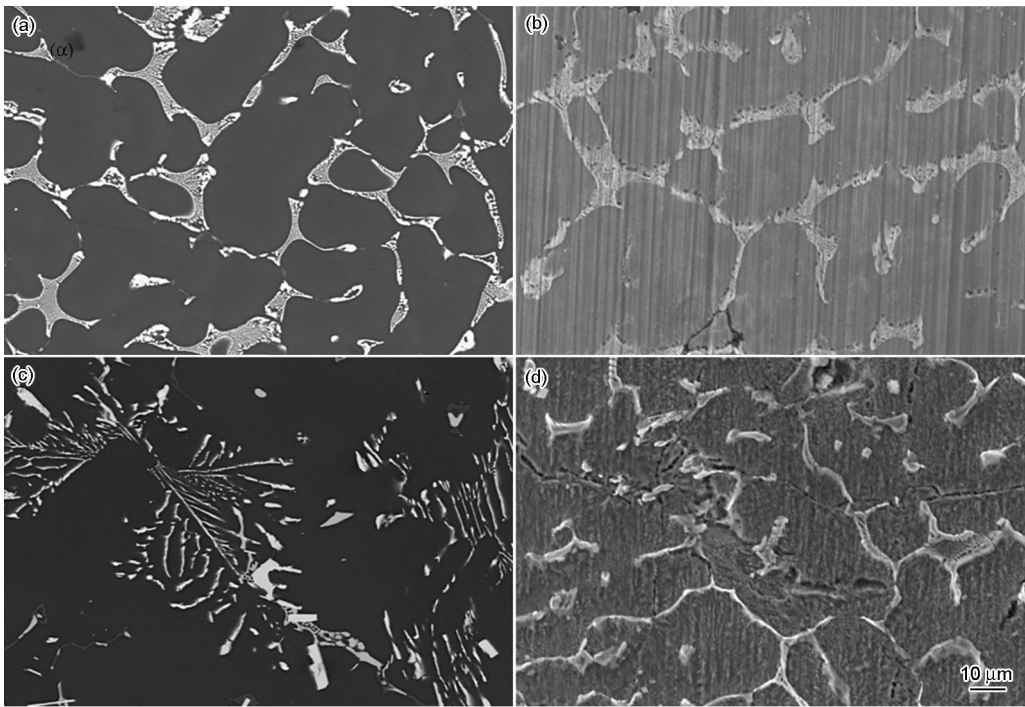


图1 合金的背散射组织形貌

Fig.1 SEM-BSE images of alloy (a) NiAl-2.5Ta-7.5Cr, (b) NiAl-2.5Ta-7.5Cr after corrosion, (c) NiAl-2.5Ta-7.5Cr-1B, (d) NiAl-2.5Ta-7.5Cr-1B after corrosion

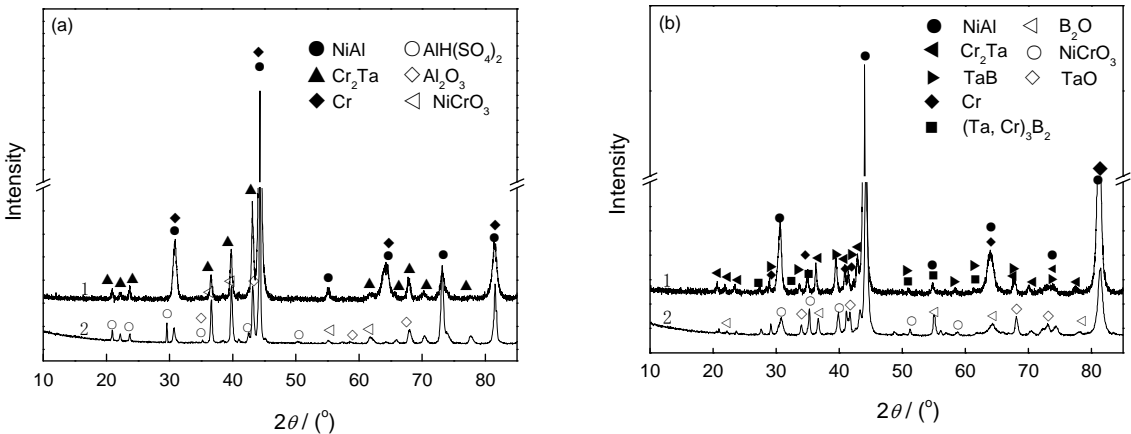


图2 两种合金腐蚀前后的XRD图谱

Fig.2 XRD pattern of two kind NiAl alloys corrosion before (1) and after (2) (a) NiAl-2.5Ta-7.5Cr, (b) NiAl-2.5Ta-7.5Cr-1B



2.5Ta-7.5Cr 合金, NiAl-2.5Ta-7.5Cr-1B 合金的自然腐蚀电位较正, 钝化电流密度较小, 具有更好的钝化性能及耐腐蚀性能<sup>[12-13]</sup>。

### 2.3 合金的腐蚀磨损实验结果与分析

2.3.1 腐蚀磨损实验结果 图4给出了两种合金在  $H_2SO_4$  溶液中的摩擦磨损性能。由图4可见, NiAl-2.5Ta-7.5Cr-1B 合金的摩擦系数除了  $10\text{ N}+0.05\text{ m/s}$  工况外均小于 NiAl-2.5Ta-7.5Cr 合金, NiAl-2.5Ta-7.5Cr-1B 合金的磨损率为  $0.695-1.69\times 10^{-15}\text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{N})$ ,

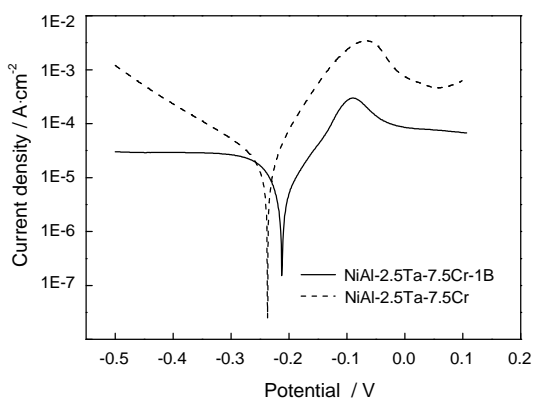


图3 两种合金在酸溶液中的电学极化曲线

Fig.3 Anodic polarization curves of two kind NiAl alloys in acid solution

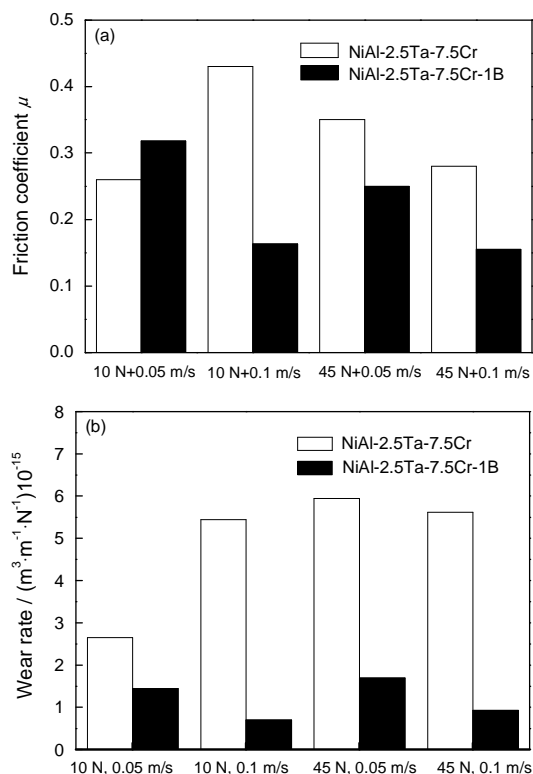


图4 两种合金在酸溶液中的腐蚀磨损性能

Fig.4 Friction and corrosion wear properties of two kind NiAl alloys in acid solution (a) friction coefficient, (b) wear rate

磨损率比 NiAl-2.5Ta-7.5Cr 提高了 2-8 倍。这表明, B 元素的添加明显降低了 NiAl-2.5Ta-7.5Cr 合金的酸腐蚀磨损率。

2.3.2 NiAl-2.5Ta-7.5Cr 合金的腐蚀磨损形貌 图5给出了 NiAl-2.5Ta-7.5Cr 合金在  $H_2SO_4$  介质中的磨痕表面形貌。可以看出, 合金的表面呈现出清晰的基体组织形貌。在  $10\text{ N}+0.05\text{ m/s}$  工况下, 合金表面呈现出较浅的犁削形貌且存在大量的点蚀凹坑特征, 表面比较疏松(图5a)。随着滑动速度增加至  $0.1\text{ m/s}$ (图5b所示)磨损表面较平滑, 犁削特征变浅变窄, 点蚀凹坑特征减弱。随着载荷增加  $45\text{ N}$ (图5c所示)磨损表面点蚀凹坑特征减弱, 犁削特征略增, 并出现白色的磨屑颗粒。随着滑动速度和载荷增加到  $45\text{ N}+0.1\text{ m/s}$ 时(图5d所示), 磨损表面犁削特征清晰可见, 出现大量的白色磨屑颗粒, 且呈不连续状分布在犁沟上。EDS 分析结果表明, 白色磨屑颗粒由 33.35% O, 16.07% Al, 1.68% Cr, 48.9% Ni(原子分数, %)组成, 可能由  $Al_2O_3$ ,  $NiCrO_3$ ,  $NiAl$  等组成。

对于 NiAl-2.5Ta-7.5Cr 合金, 腐蚀加速磨损的原因在于金属组织结构的不均匀性, 腐蚀会破坏晶界、相界或其他组织的完整性, 降低其结合强度, 腐蚀后的材料表面疏松、多孔, 很容易被磨头刮掉而增加材料流失量<sup>[14]</sup>。这导致在  $10\text{ N}$  工况下随着滑动速度的增加合金的磨损表面由  $NiCrO_3$ 、 $Al_2O_3$ 、 $AlH(SO_4)_2$  等组成的反应物膜的生成速度与滑动速度的比值降低, 反应物膜被更快的剪切使合金的磨损率增大。反应物膜被更快的剪切, 可能使合金磨损表面露出部分金属基体, 磨损过程在新鲜金属表面进行导致较高的摩擦系数。

磨损加速腐蚀的原因在于, 磨损导致表面位错集中, 在高载下尤甚, 位错交截产生空位, 空位浓度与塑性变形量有关。因此, 磨损表层中空位浓度随着载荷的增加而增加, 空位破坏了原子晶格规则排布, 并在周围晶体中引起弹性畸变, 导致磨损表面内能增加而使耐蚀性降低<sup>[14]</sup>。这导致在  $45\text{ N}$  工况下合金磨损表面生成了更多的由  $NiCrO_3$ 、 $Al_2O_3$ 、 $AlH(SO_4)_2$  等组成的反应物膜, 在磨头的犁削作用下大量反应物膜被犁削下来, 形成大量的白色磨屑颗粒, 并反过来对合金磨损表面产生犁削作用。故合金磨损表面犁削特征增强, 合金的磨损量增加。大量的白色磨屑颗粒在往复摩擦过程中可能使磨损机制从滑动变成滚动<sup>[15]</sup>, 在降低摩擦因数的同时, 也对表面产生犁削作用。因此, NiAl-2.5Ta-7.5Cr 合金在  $H_2SO_4$  介质中的磨蚀受控于腐蚀磨损

和磨粒磨损。

**2.3.3 NiAl-2.5Ta-7.5Cr-1B 合金的腐蚀磨损形貌** 图 6 给出了 NiAl-2.5Ta-7.5Cr-1B 合金在  $\text{H}_2\text{SO}_4$  中的磨痕表面形貌。可以发现, 合金的磨损表面没有呈现出基体组织形貌, 表明磨损表面生成了一层物质膜覆盖在磨损表面。在  $10\text{ N}+0.05\text{ m/s}$  工况下合金磨损表面较平整、光滑, 表面覆盖的物质膜中存在白色的点状和片状物质, 并且呈现较大的点蚀凹坑和块状剥落特征(图 6a)。随着滑动速度增加到  $0.1\text{ m/s}$ (图 6b)合金磨损表面剥落特征减弱, 出现犁沟特征, 白色的点状和片状物质增多。随着载荷增加至  $45\text{ N}$  合金磨损表面剥落特征减弱, 犁沟特征增强, 白色的点状和片状物质增多。当载荷和滑动速度增加至  $45\text{ N}+0.1\text{ m/s}$  时, 合金磨损表面呈现出塑性碾压犁沟特征。其原因是,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  表面微凸体压入合金表面膜作为切削工具在表面滑动, 使磨损表面被剪切、犁皱或切削, 故在合金磨损表面留下了宽而深的犁沟。EDS 分析结果表明, 白色物质可能由 TaB,  $\text{B}_2\text{O}_3$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  组成。图 6d 表明, 白色物质在摩擦力的作用下表现出较好的延展性, 并牢固的附着在合金磨损表面的物质膜上, 有助于在滑动磨损过程中保存物质膜完整的覆盖在合金磨损表面, 完全隔离合金与  $\text{Si}_3\text{N}_4$  的接触, 形成物质膜/ $\text{Si}_3\text{N}_4$  磨损状态。

由此可见, NiAl-2.5Ta-7.5Cr-1B 合金在  $\text{H}_2\text{SO}_4$  介

质中的磨蚀受控于腐蚀磨损以及完整的物质膜的保护作用。

由腐蚀磨损造成的材料流失不仅是单纯的磨损与单纯腐蚀之和, 而是远远大于它<sup>[14]</sup>。1949 年 Zelder 首次提出材料腐蚀与磨损之间的交互作用, 即腐蚀可以加速磨损, 磨损也可以促进腐蚀, 从而加速材料的破坏<sup>[16]</sup>。只有控制磨损和腐蚀的任何一方, 才有可能降低交互作用增量, 从而较大幅度地减少材料流失量<sup>[14]</sup>。

NiAl-2.5Ta-7.5Cr-1B 合金在酸溶液中易钝化成膜; 形成的表面膜耐蚀性能比较好, 对材料流失表现出较好的抑制能力; 表面膜中的白色物质具有较好的塑性, 在经受摩擦力后表现出较好的延展性牢固的附着在表面膜上, 有助于在滑动磨损过程中保存物质膜完整的覆盖在合金磨损表面, 抑制腐蚀加速磨损作用。

NiAl-2.5Ta-7.5Cr 合金比 NiAl-2.5Ta-7.5Cr-1B 合金在酸溶液中耐腐蚀性能略差, 腐蚀后的材料表面疏松、多孔, 很容易被磨头刮掉而增加材料流失量<sup>[14]</sup>, 易导致腐蚀加速磨损。故  $\text{Si}_3\text{N}_4$  等硬的氧化物对 NiAl-2.5Ta-7.5Cr 合金的犁削作用, 导致其磨损率比 NiAl-2.5Ta-7.5Cr-1B 合金的大。

综上所述, B 元素的添加提高了 NiAl-2.5Ta-7.5Cr 合金的钝化倾向、耐酸腐蚀性以及耐酸腐蚀磨损性能。

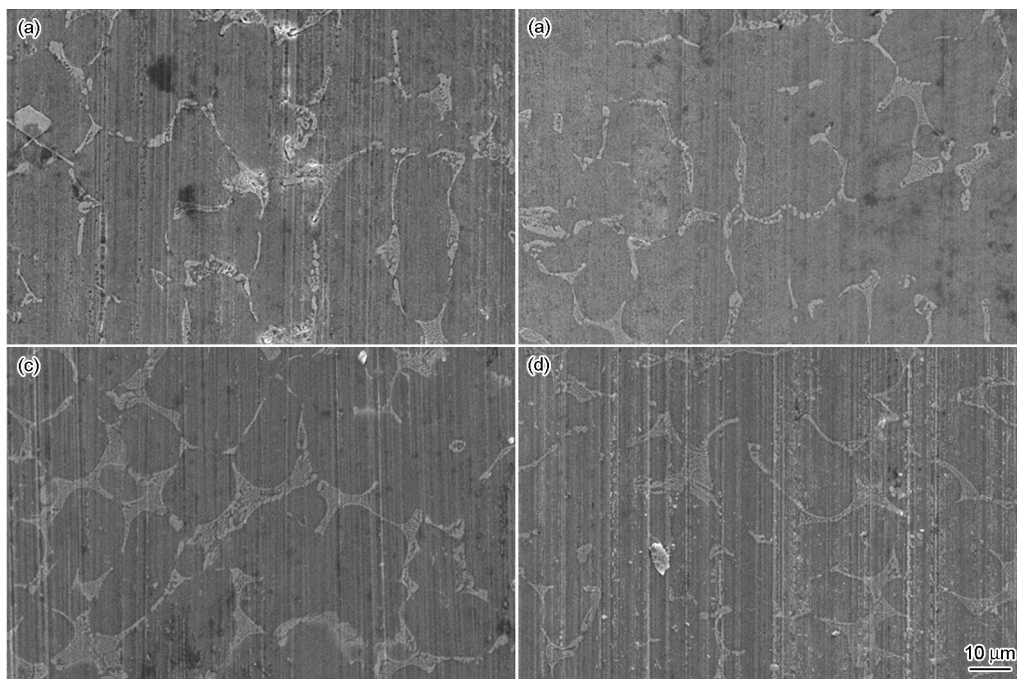


图 5 NiAl-2.5Ta-7.5Cr 合金在不同酸溶液中的磨痕表面形貌

**Fig.5** Wear morphologies of NiAl-2.5Ta-7.5Cr alloy in acid solution (a)  $10\text{ N}+0.05\text{ m/s}$ , (b)  $10\text{ N}+0.1\text{ m/s}$ , (c)  $45\text{ N}+0.05\text{ m/s}$ , (d)  $45\text{ N}+0.1\text{ m/s}$



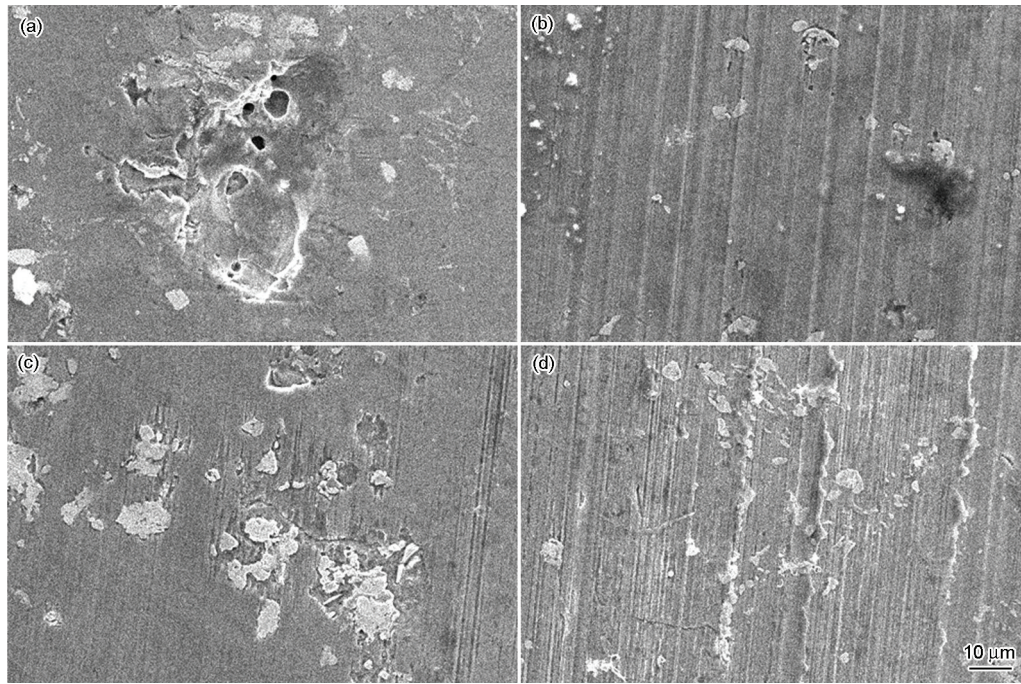


图6 NiAl-2.5Ta-7.5Cr-1B合金在不同酸溶液中的磨痕表面形貌

Fig.6 Wear morphologies of NiAl-2.5Ta-7.5Cr-1B alloy in acid solution (a) 10 N+0.05 m/s, (b) 10 N+0.1 m/s, (c) 45 N+0.05 m/s, (d) 45 N+0.1 m/s

### 3 结 论

1. NiAl-2.5Ta-7.5Cr-1B合金的耐蚀性能优于NiAl-2.5Ta-7.5Cr合金,易钝化成膜,静置腐蚀速率为 $0.007\text{mg}/(\text{cm}^2\cdot\text{h})$ ,钝化电流密度为 $0.299(\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$ ,自然腐蚀电位为 $-0.213\text{V}$ ,表现出良好的耐酸腐蚀性能及稳定性。

2. 在 $5\%\text{H}_2\text{SO}_4$ 介质中NiAl-2.5Ta-7.5Cr-1B合金的磨损率比NiAl-2.5Ta-7.5Cr合金减小了2-8倍,因为物质膜完整的覆盖在合金磨损表面,减小了腐蚀加速磨损的作用。

3. NiAl-2.5Ta-7.5Cr合金的磨蚀机制受控于腐蚀磨损和磨粒磨损,NiAl-7.5Cr-2.5Ta-1B合金的磨蚀受控于腐蚀磨损和完整物质膜的保护作用。

### 参 考 文 献

- 1 GUO Jianting, *Ordered Intermetallic Compound NiAl Alloy* (Beijing, Science Press, 2003) P75  
(郭建亭, 有序金属间化合物镍铝合金 (北京, 科学出版社, 2003) P75)
- 2 Noebe R D, Bowman R R, Nathal M V, Physical and mechanical properties of the  $\text{B}_2$  compound NiAl, *Inter Mater Rev*, **38**(4), 193 (1993)
- 3 Miracle D B, The physical and mechanical properties of NiAl, *Acta Metall Mater*, **41**(3), 649(1993)
- 4 WANG Zhenshen, GUO Jianting, ZHOU Lanzhan, XIE Yi, SHENG Liyuan, HU Zhuangqi, Investigation of friction and wear behavior of NiAl-based alloys at room temperature, *Chinese Journal of materials research*, **23**(3), 225(2009)

(王振生, 郭建亭, 周兰章, 谢 亿, 盛立远, 胡壮麒, 三种NiAl材料的室温摩擦磨损性能研究, 材料研究学报, **23**(3), 225(2009))

- 5 Mishra S C, Satapathy Alok, Chhaithanya M, Wear characteristics of plasmasprayed nickel-aluminum composite coatings, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, **28**(23), 2931(2009)
- 6 WANG Zhenshen, GUO Jianting, ZHOU Lanzhan, SHENG Liyuan, HU Zhuangqi, High temperature wear behavior of NiAl-Cr(Mo)-Ho-Hf eutectic alloy, *Acta Metallurgica Sinica*, **45**(3), 297 (2009)  
(王振生, 郭建亭, 周兰章, 盛立远, 胡壮麒, NiAl-Cr(Mo)-Ho-Hf共晶合金的高温磨损特性, 金属学报, **45**(3), 297(2009))
- 7 WANG Zhenshen, ZHOU Lanzhan, GUO Jianting, HU Zhuangqi. Wear behavior of in situ composite NiAl- $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiC at high temperature, *Tribology*, **28**(6), 497(2008)  
(王振生, 周兰章, 郭建亭, 胡壮麒, 原位内生NiAl- $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiC的高温磨损特性, 摩擦学报, **28**(6), 497(2008))
- 8 WANG Zhensheng, ZHANG Mengen, YANG Shuangshuang, GUO Jianting, ZHOU Lanzhan, CHEN Zhigang. Microstructure mechanical friction and wear properties of NiAl-2.5Ta-7.5Cr-1B alloy, *Acta Metallurgica Sinica*, **49**(11), 1325(2013)  
(王振生, 张孟恩, 杨双双, 郭建亭, 周兰章, 陈志钢, NiAl-2.5Ta-7.5Cr-1B合金的微观组织、力学性能与摩擦磨损特性, 金属学报, **49**(11), 1325(2013))
- 9 WANG Zhenshen, ZHOU Lanzhan, GUO Jianting, ZHANG Guangye, HU Zhuangqi. Friction and wear behavior of NiAl-Cr(Mo)-Cr<sub>x</sub>Sy self-lubricating composite, *Tribology*, **30**(6), 589(2010)  
(王振生, 周兰章, 郭建亭, 张光业, 胡壮麒, NiAl-Cr(Mo)-Cr<sub>x</sub>Sy自润滑复合材料的摩擦磨损特性, 摩擦学报, **30**(6), 589(2010))
- 10 WU Haipeng, LI wenjing, GUO Li, PAN Yanfei, XU Xiufen, Ef-

- fect of promoter species and precursors on catalytic activity of alkali metal promoted NiAl mixed oxides for  $N_2O$  decomposition, *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, **39**(7), 550(2011)  
(武海鹏, 李文静, 郭 丽, 潘燕飞, 徐秀峰, 碱金属助剂类型及前驱物对改性 NiAl 复合氧化物催化分解  $N_2O$  活性的影响, 燃料化学学报, **39**(7), 550(2011))
- 11 WANG Fengping, KANG Wanli, JING Hemin, *Electrochemical fundamentals methods and applications* (Beijing, Chemical Industry Press, 2008)p.62  
(王凤平, 康万利, 敬和民, 腐蚀电化学原理、方法及应用, (北京, 化学工业出版社, 2008)p.62)
- 12 LIU Yonghui, ZHANG Peifen, *Principle and Application of Metal Corrosion*, (Beijing, Aviation Industry Press, 1993)p.87-88  
(刘永辉, 张佩芬, 金属腐蚀学原理, (北京, 航空工业出版社, 1993)p.87-88)
- 13 ZHANG Jingyu, LIU Qingfeng, LIU Qian, Effect of Ti on the AN-Ti-corrosion property of Zn-Al alloy films, *Acta Metallurgica Sinica*, **49**(10), 1168(2009)  
(张静玉, 刘庆峰, 刘 茜, Ti 对 Zn-Al 合金薄膜耐腐蚀性能的影响, 金属学报, **49**(10), 1168(2009))
- 14 JIANG Xiaoxia, LI Shizhuo, LI Shu, *Corrosive Wear of Metals* (first edition)(Beijing, Chemical Industry Press, 2003)p.198-308  
(姜晓霞, 李诗卓, 李 曙, 金属的腐蚀磨损(第一版)(北京, 化学工业出版社, 2003)p.198-308)
- 15 LEI Ali, LI Gaohong, FENG Lajun, DONG Nan, Structure and abrasability of Cu-  $Al_2O_3$  gradient coatings fabricated by plasma spraying, *Transaction of the China Welding Institution*, **29**(5), 65 (2008)  
(雷阿利, 李高宏, 冯拉俊, 董 楠, 等离子喷涂 Cu- $Al_2O_3$  梯度涂层的组织与耐磨性析, 焊接学报, **29**(5), 65(2008))
- 16 Postlethwaite J, Tinker E B, Hawrylak M W, Erosion corrosion in slurry pipelines, *Corrosion*, **30**(8), 285(1974)